

制动器试验台的控制方法设计及评价

摘要

本文首先从分析制动器试验台的工作原理出发,探讨等效的转动惯量、机械惯量和补偿惯量之间的联系,建立了制动器试验台的系统动力方程模型。然后基于此模型,探讨了制动扭矩、电驱动扭矩同各个转动惯量和制动器的运动规律之间的联系,得到了电动机驱动电流与制动扭矩、转速之间的函数关系。

问题一中,我们得到等效的转动惯量为 $52\text{kg}\cdot\text{m}^2$; 问题二中,需要电动机补偿 $12\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 或 $-18\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 的惯量; 问题三中,我们得到电流依赖于可观测量的数学模型为:

$$I(t) = \eta \left(\frac{1-k}{k} \right) T_b(t), \text{ 并且求得所给条件下的驱动电流值为 } 174.8\text{A} \text{ 或 } -262.2\text{A}.$$

对于问题四,提出并采用制动耗能误差指标、角加速度的偏离指标和角速度的偏离指标这三个指标对测试数据进行了评价,发现测试数据都与这几个评价指标符合得不算好,尤其是在制动耗能误差指标上,更是达到了惊人的 5.48%,这个预测控制方案的控制效果并不能让人满意。

对于问题五,设计了预测控制方案并对所设计的方案进行了评价。首先我们提出了一种开路预测控制方案,只要求一个确定时刻的控制电流同这个时刻的制动扭矩成一定的比例关系。这个预测控制方案在一定程度上能够比较好的模拟实际制动过程,但是由于缺乏反馈,试验台的误差可能会逐渐累积从而影响到测试的效果。然后我们又引入电能量误差作为反馈改进第一个方案,提出了基于能量反馈的电流控制模型。最后我们又定义了制动耗能误差指标、角加速度的稳定度指标、驱动电流的绝对准确性指标和制动力矩稳定度指标,并用空间距离综合模型进行了说明。

在问题六中,针对传统 PID 控制器参数不能随电动机驱动电流而适时整定的缺点,提出了基于 BP 神经网络自适应 PID 控制器的电惯量系统控制策略,建立了电动机驱动电流动态实时调节模型。将模型简化后通过仿真,输出的电流值能够很快保持稳定,并且能有效的排除噪声的干扰,证明了本模型有较强的鲁棒性和抗干扰能力。

最后,在模型的比较中,我们在复杂度和精度两方面对基于能量反馈的电流控制模型和基于 BP 神经网络的自适应 PID 控制模型进行了详细比较:前者复杂度较低,但是模型精度不高;后者模型精度很高,但是复杂度可以很高,以致数据处理较困难。在模型的推广中,我们介绍了基于 BP 神经网络的自适应 PID 控制模型的应用前景,并且提出了用时间序列分析方法和广义预测控制 GPC 来解决本问题,可能也会得到较满意的结果。

关键词: 预测控制 反馈 空间距离综合评价 BP 神经网络 PID 仿真

一、问题重述

汽车的行车制动器（以下简称制动器）联接在车轮上，它的作用是在行驶时使车辆减速或者停止。制动器的设计是车辆设计中最重要的一环之一，必须对其性能的优劣进行相应的测试。

在车辆设计阶段必须采用专门的**制动器试验台**来对所设计的制动器进行模拟试验。试验台上制动器的制动过程应尽量与现实中车辆制动器的制动过程相一致。通常试验台仅安装、试验单轮制动器，而不是同时试验全车所有车轮的制动器。制动器试验台一般由安装了飞轮组的主轴、驱动主轴旋转的电动机、底座、施加制动的辅助装置以及测量和控制系统等组成。被试验的制动器安装在主轴的一端，当制动器工作时会使主轴减速。试验台工作时，电动机拖动主轴和飞轮旋转，达到与设定的车速相当的转速（模拟实验中，可认为主轴的角速度与车轮的角速度始终一致）后电动机断电**同时施加制动**，当满足设定的结束条件时就称为完成一次制动。

现实中车辆的指定车轮在制动时承受载荷。将这个载荷在车辆平动时具有的能量（忽略车轮自身转动具有的能量）等效地转化为试验台上飞轮和主轴等机构转动时具有的能量，与此能量相应的转动惯量（以下转动惯量简称为惯量）在本题中称为**等效的转动惯量**。试验台上的主轴等不可拆卸机构的惯量称为基础惯量。飞轮组由若干个飞轮组成，使用时根据需求选择几个飞轮固定到主轴上，这些飞轮的惯量之和再加上基础惯量称为机械惯量。由于飞轮的质量是固定的，对于一个制动器试验台，它的机械惯量只能取一些离散的值。对于**等效的转动惯量不在这些离散值中的情况**，就不能精确地用机械惯量模拟试验。**解决这个问题**的方法是：把机械惯量设定为距等效的转动惯量最小的值，然后在制动过程中，让电动机在所设定的电流控制下参与工作，补偿由于机械惯量不足而缺少的能量，从而满足模拟试验的要求。

问题一：已知车辆单个前轮的滚动半径为 0.286 m，制动时承受载荷为 6230 N，求等效的转动惯量。

问题二：飞轮组由 3 个外直径 1 m、内直径 0.2 m 的环形钢制飞轮组成，厚度分别为 0.0392 m、0.0784 m、0.1568 m，钢材密度为 7810 kg/m^3 ，基础惯量为 $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ，求可以组成的机械惯量。电动机能补偿的能量相应的惯量的范围为 $[-30, 30] \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ，对于问题一中得到的等效的转动惯量，求需要用电动机补偿的惯量。

问题三：建立电动机驱动电流依赖于可观测量的数学模型。并在问题一和问题的基础上，制动减速度为常数，初始速度为 50 km/h，制动 5.0 秒后车速为零，计算这种条件下的驱动电流。

问题四：对于与所设计的路试等效的转动惯量为 $48 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ，机械惯量为 $35 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ，主轴初转速为 514 转/分钟，末转速为 257 转/分钟，时间步长为 10 ms 的情况，用某种控制方法试验得到的数据见附表。试评价该方法执行的结果。

问题五：利用问题三得出的数学模型，给出根据前一个时间段观测到的瞬时转速与/或瞬时扭矩，设计本时间段电流值的计算机控制方法并加以评价。

问题六：问题五的控制方法是否有不足之处？如果有，重新设计一个尽量完善的计算机控制方法并加以评价。

二、问题分析

2.1 问题背景分析

本题是针对实际的制动试验台所配有的机械惯量，不能满足复杂的测试要求，从而提出的一种用采用**电惯量补偿思路**的模拟方法来弥补不足。

若电流控制系统能够**实时**地采集数据信息并即时决策，则能够很好地进行模拟，但这是几乎不可能的，实际情况总会有一定的**时滞**，模拟出来的制动特性，总会和真实的情况有一定差别。怎样控制电流，使这个擦差别最小，就是**根本的问题**所在。

2.2 试验过程分析

设想有两台试验机，一台是机械惯量恰好能够满足试验要求，另一台需要采用电惯量补偿。这两个试验机，给定相同的被检测的制动系统（制动机理未知），相同的初始条件（如转速等），则它们在试验过程中所测得的数据应该基本吻合。

但实际情况不存在机械惯量恰好满足试验要求的试验机器，所以对于需要电惯量补偿的试验机所测得的数据来说，就没有“**标准**”可供**模拟**，这就使得如何控制电流这个问题复杂化了。如何在没有“标准”的情况下评价电流控制方案的好坏，就是本文所需解决的问题之一。

2.3 问题的分解和整合

(1) 问题一与问题二是数据准备阶段，它解决的问题是如何确定等效惯量，机械惯量和电动惯量；

(2) 问题三解决的是如何在保证惯量匹配（机械惯量和电惯量的合作用与等效惯量相同）的条件下，从理论上确定电流随瞬时扭矩与/或瞬时转速的关系。为问题五与问题六做理论上的准备；

(3) 问题四，对于在某个控制方案下的试验结果进行评价分析，为控制方案的设计及评价作铺垫；

(4) 问题五和问题六需要解决的问题是设计电流控制方案，尽量避免时滞的影响，并建立评价系统，对控制方案进行评价和改进。

三、模型假设

基于问题实际，本文提出以下合理假设：

- (1) 模拟实验中，可认为主轴的角速度与车轮的角速度始终一致；
- (2) 试验台采用的电动机的驱动电流始终与其产生的扭矩成正比；
- (3) 路测和模拟试验过程中只考虑制动器和电动机的做功，其他的能量损耗不记；
- (4) 制动器的作用机理，不随环境的变化而改变；
- (5) 假设车辆在水平道路上行驶，重力不对车辆做功；
- (6) 假设路试时轮胎与地面的摩擦力为无穷大，因此轮胎与地面无滑动。

四、符号说明

以下符号为基本符号，全文适用。

表格 1 基本符号说明

符号	解释说明	单位/备注
J_v	某车轮承受的制动载荷在制动过程中所具有的能量等效地转化到飞轮和主轴等装置上的转动惯量	$kg \cdot m^2$
J_m	试验过程中的机械惯量	$kg \cdot m^2$
J_s	电机补偿的惯量，下文称为“电惯量”	$kg \cdot m^2$
T_b	制动扭矩	$N \cdot m$
T_d	电驱动扭矩	$N \cdot m$
n	飞轮转速	r/min
Δt	离散化的时间间隔	10ms
I	驱动电流	A
η	电动机的驱动电流与其产生的扭矩的比例系数	$A / (N \cdot m)$
k	惯量比拟系数 $k = \frac{J_v}{J_m}$	/
ω	主轴转动角速度	rad/s
β	主轴转动角加速度	rad/s ²

五、问题一的模型建立与求解

5.1 模型建立

物理学中等效的成立，要从能量和动量两个方面考虑。下面给出车轮承受的制动载荷的等效惯量的计算模型。

局部符号说明（只适用于本模型建立）：

F —— 制动载荷	v —— 汽车平动时的速度
g —— 重力加速度	ω —— 汽车平时时车轮的角速度
m —— 制动载荷对应的质量	R —— 车轮的滚动半径
T —— 制动扭矩	f —— 地面对车轮的摩擦力
J' —— 车轮的转动惯量	

(1) 从能量上考虑

根据题中的定义，制动时承受的载荷在平动时所具有的能量，即它的动能为：

$$E_1 = \frac{1}{2}mv^2$$

等效惯量在转动的时候所具有的能量为：

$$E_2 = \frac{1}{2}J_v\omega^2$$

若要求等效，则要求 $E_1 = E_2$ 。又因为题中假设路试时轮胎与地面之间无滑动，则根据物理关系有 $v = R\omega$ ，根据重力与质量的关系有： $m = F / g$ ，联立以上方程求解得：

$$J_v = FR^2 / g \quad (0.1)$$

(2) 从动量上考虑

车的动量改变规律和等效惯量应该相同，也就是说，对于相同的制动扭矩 T ，车轮角加速度 β_1 与等效惯量的角加速度 β_2 相同

● 车轮角加速度 β_1 的计算

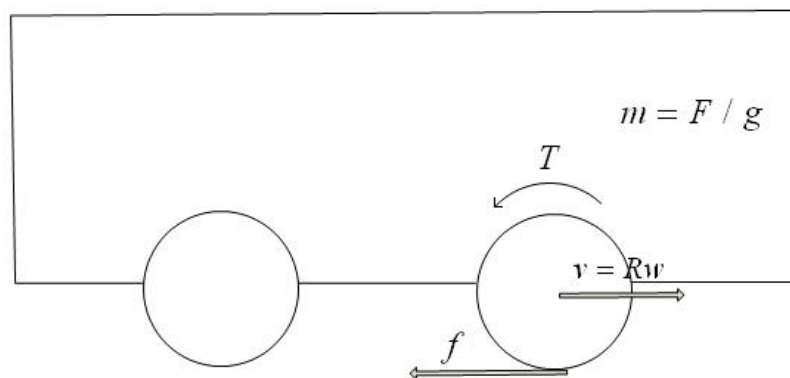


图 1 车轮角加速度计算示意图

由于摩擦力 f 的作用，使得车辆减速行驶：

$$m \frac{dv}{dt} = -f \Rightarrow mR \frac{d(\omega)}{dt} = mR\beta_1 = -f$$

单独分析汽车车轮， f 与 T 的力矩的作用，使得车轮的角速度改变：

$$fR - T = J' \beta_1$$

联立以上两式，有 $\beta_1 = -\frac{T}{mR^2 + J'}$ ，又因为题中假设车轮的能量忽略，故 $J' \ll mR^2$ ，最后有：

$$\beta_1 = -\frac{T}{mR^2}$$

●等效惯量角加速度 β_1 的计算，可由基本的物理公式得出 $\beta_2 = -\frac{T}{J_v}$

由 $\beta_1 = \beta_2$ ， $m = F/g$ ，得出：

$$J_v = FR^2 / g \quad (0.2)$$

(0.1) 式或 (0.2) 式为等效惯量的计算模型。

5.2 模型求解

已知 $F = 6230N$ ， $R = 0.286m$ ， g 取 9.8，代入 (0.2) 式计算可得：

$$J_v = 52kg \cdot m^2$$

六、问题二的模型建立与求解

6.1 模型建立

本文直接给出环形飞轮的转动惯量计算公式：

$$J = \int_a^b (2\pi r dr) h \rho r^2 = \frac{1}{2} \pi h \rho (b^4 - a^4) \quad (0.3)$$

公式推导可见参考文献，示意图及补充符号（只适用于本模型建立）说明如下：

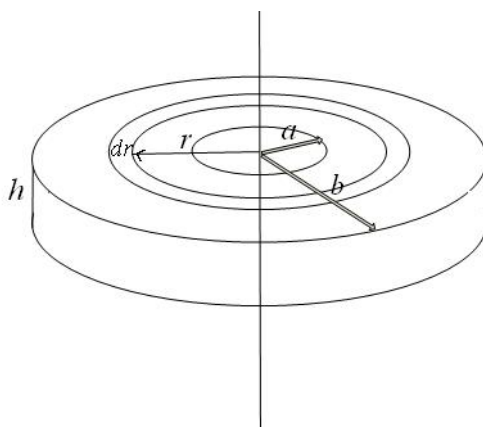


图 2 飞轮转动惯量计算示意图

a ——飞轮内半径 b ——飞轮外半径
 h ——飞轮厚度 ρ ——钢材密度

6.2 模型求解

(1) 三个飞轮的转动惯量计算

参数为： $a = 0.1m$, $b = 0.5m$, $\rho = 7810kg / m^3$, $h_1 = 0.0392m$, $h_2 = 0.0784m$, $h_3 = 0.1568m$

代入 (0.3) 式，得出三个飞轮的转动惯量分别为（取整后的结果）：

$$J_1 = 30kg \cdot m^2 \quad J_2 = 60kg \cdot m^2 \quad J_3 = 120kg \cdot m^2$$

(2) 可能的机械惯量取值计算

表格 2 机械惯量组成表

序号	基础惯量 10kgm ²	惯量为 30kgm ² 的飞轮	惯量为 60kgm ² 的飞轮	惯量为 120kgm ² 的飞轮	可组成的 机械惯量	需电动机 补偿的惯量
1	★				10 kgm ²	42 kgm ²
2	★	★			40 kgm ²	12 kgm ²
3	★		★		70 kgm ²	-18 kgm ²
4	★			★	130 kgm ²	-78 kgm ²
5	★	★	★		100 kgm ²	-48 kgm ²
6	★	★		★	160 kgm ²	-108 kgm ²
7	★		★	★	190 kgm ²	-138 kgm ²
8	★	★	★	★	220 kgm ²	-168 kgm ²

其中，表格中的★表示选择该种飞轮。

在基础惯量 $10kg \cdot m^2$ 不能少的情况下，一共有 $C_3^3 + C_3^2 + C_3^1 + C_3^0 = 8$ 种方案，所以直接给可能的组合机械惯量（单位为 $kg \cdot m^2$ ）有：

10 40 70 130 100 160 190 220

(3) 选择机械惯量和电动机需要补充的电惯量

问题一中的等效惯量： $J_v = 52kg \cdot m^2$ ，给出的电惯量补偿能力为 $[-30, 30]kg \cdot m^2$ ，所以选择的机械惯量的范围为 $[52-30, 52+30]kg \cdot m^2 = [22, 82]kg \cdot m^2$ ，这里可以选择两种机械惯量 $40kg \cdot m^2$ ， $70kg \cdot m^2$ ，分别需要补偿的电惯量为 $12kg \cdot m^2$ ， $-18kg \cdot m^2$ 。

但是，依据题意，制动过程中，电动机在在电流的作用下参与工作，补偿由于机械惯量不足而缺少的能量。所以应该选择机械惯量小于等效惯量，补偿的惯量为正的情况。即机械惯量选择 $40kg \cdot m^2$ ，这样做有两个好处：一是电动机带动飞轮转动时的转动方向与制动过程中电动机的转动方向是一致的，这意味着可以选择不带换向功能的成本更低的电动机或是可以省去复杂的换向机构，并且可以使电动机从带动飞轮转动到进入制动

阶段的反应时间变短。二是可以减少一次模拟实验的能量损耗，如果机械惯量大于等效惯量，则在赋给飞轮一个足够大的初速度阶段，电动机要消耗额外的能量去带动这部分额外的惯量，并且同样在制动阶段，电动机也要花费额外的能量去让那部分额外的惯量速度降下来，这是相当不划算的，尤其是当需要进行多次实验，如测试制动器的寿命时，采用大于等效惯量的机械惯量浪费的能量是相当惊人的。

七、问题三的模型建立与求解

7.1 模型建立

本模型的建立是在**理想的条件下**建立的，能够确定电流 i 随瞬时扭矩 T_b 与（或）瞬时转速 n 的变化规律。

理想条件：保证在电流驱动扭矩 T_d 的作用下，使整个**试验过程与标准过程**（假设存在机械惯量与等效惯量 J_v 匹配的试验过程）一致。建立过程如下：

局部符号说明（只适用于本模型建立）：

$\beta_1(t)$ ——试验过程中 t 时刻的飞轮角加速度

$\beta_2(t)$ ——标准过程中 t 时刻的飞轮角加速度

$T_d(t)$ —— t 时刻的电流驱动扭矩

$T_b(t)$ —— t 时刻的瞬时扭矩（制动扭矩）

(1) 试验过程分析

在某一时刻 t ，在电流驱动扭矩 $T_d(t)$ 和瞬时扭矩（制动扭矩） $T_b(t)$ 的作用下，试验机飞轮会产生角加速度 $\beta_1(t)$ ：

$$T_d(t) + T_b(t) = J_m \beta_1(t)$$

(2) 标准过程分析（假设存在机械惯量与等效惯量 J_v 匹配的试验过程分析）

在同样的时刻 t ，在同样的瞬时扭矩（制动扭矩） $T_b(t)$ 作用下，飞轮会产生角加速度 $\beta_2(t)$ ：

$$T_b(t) = J_v \beta_2(t)$$

(3) 在理想条件下， $\beta_1(t) = \beta_2(t)$ ，所以可以推导得出：

$$\beta_1(t) = \beta_2(t) = \frac{T_b(t)}{J_v} \quad (0.4)$$

$$T_d(t) = \left(\frac{J_m}{J_v} - 1\right) T_b(t) \quad (0.5)$$

根据符号定义惯量比拟系数 $k = \frac{J_v}{J_m}$ ，又题目中已知 $I(t) = \eta T_d(t)$ ，可观测的瞬时扭矩 $T_b(t)$ 满足 $t = N\Delta t$ ， $N = 0, 1, 2, \dots$ ，代入(0.5)后得出**电流依赖可观测**量 $T_b(t)$ 的模型：

$$I(N\Delta t) = \eta \left(\frac{1-k}{k} \right) T_b(N\Delta t) \quad N = 0, 1, 2, \dots \quad (0.6)$$

模型分析:

以上模型的建立条件太强，它要求试验过程整个过程的任意时刻，瞬时角加速度、瞬时转速和瞬时扭矩均与标准过程相同，其实可以把这个条件放宽，只要求过程中某些离散时刻的瞬时转速和瞬时扭矩相同即可，且不需要瞬时加速度相同。

接下来从**能量的角度**进行模型建立：

将时间离散成若干个时间节点，相隔 $\Delta t = 10ms$ ， $t_i = i\Delta t$ i 为非负整数

放松后的条件：离散时刻的瞬时转速和瞬时扭矩相同。

局部符号说明（只适用于本模型建立）：

ω_i —— t_i 时刻的飞轮角速度

n_i —— t_i 时刻的飞轮转速

(1) 试验过程分析

考虑时间节点 t_i 与 t_{i+1} 之间的能量变化：

$$[T_d(t_i) + T_b(t_i)] \cdot \left(\frac{\omega_i + \omega_{i+1}}{2} \right) \Delta t \approx \frac{1}{2} J_m (\omega_{i+1}^2 - \omega_i^2)$$

其中 $\omega_i = 2\pi n_i$

(2) 标准过程分析

考虑时间节点 t_i 与 t_{i+1} 之间的能量变化：

$$T_b(t_i) \cdot \left(\frac{\omega_i + \omega_{i+1}}{2} \right) \Delta t = \frac{1}{2} J_v (\omega_{i+1}^2 - \omega_i^2)$$

(3) 联立以上两式，并作近似 $2n_i \approx n_i + n_{i+1}$ ，在不考虑离散化误差的假设下可以得出 (0.6) 相同的模型。

7.2 模型求解

由问题一条件得 $J_v = 52 kg \cdot m^2$ ，

根据问题二，有两种选择：

(1) 选择机械惯量为 $J_m = 40 kg \cdot m^2$ ， $k = \frac{J_v}{J_m} = 1.3$

由于制动减速为常数，则加速度： $a = \frac{(0-50)}{5} \times \frac{10^3}{3600} m/s^2 = 2.78 m/s^2$

角速度： $\beta = \frac{a}{R} \approx 9.71 rad/s^2$

由于制动减速为常数，所以使得试验过程和标准过程能够完全一致，符合 7.1 中模型建立的条件，所以将以上参数先代入 (0.4) 式，再代入 (0.6) 式得出电流 I 为常值

174.8A。

(2) 选择机械惯量为 $J_m = 70 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $k = \frac{J_v}{J_m} \approx 0.743$

由于制动减速为常数, 则加速度: $a = \frac{(0-50)}{5} \times \frac{10^3}{3600} \text{ m/s}^2 = 2.78 \text{ m/s}^2$

角速度: $\beta = \frac{a}{R} \approx 9.71 \text{ rad/s}^2$

将以上参数先代入 (0.4) 式, 再代入 (0.6) 式得出电流 I 为常值 -262.2 A 。电流取负表示电动机施加制动扭矩。

八、问题四的模型建立与求解

8.1 模型建立

本节将建立一个对于一个特定预测控制方案在已知测试数据的条件下判断其优劣的评价模型。

局部符号说明 (只适用于本模型建立):

ΔE_1 ——路试时制动器耗能 v_0, v_N ——汽车的初始速度, 末速度

ΔE_2 ——试验台上制动器耗能 ω_0, ω_N ——等效装置的始末角速度

N ——试验台上记录数据的总次数 n_i ——试验测得的第 i 个转速

T_{bi} ——试验测得的第 i 个瞬时扭矩

β_i ——计算得到的第 i 个测量点的角加速度

n'_i ——拟合得到的第 i 个测量点的转速

8.1.1 结果评价指标的建立

(1) 制动耗能误差指标 θ_1

意义: 能够量化试验室中采用电流驱动补偿的试验方法, 和理想的路试情况的差距, 间接反应出试验结果的好坏。这个指标也直接影响对制动器性能 (如耐磨性等) 的测试。

定义: 在相同的制动器、相同的初始速度和终止速度下,

$$\text{制动耗能误差指标 } \theta_1 = \left| \frac{\text{路试时制动器耗能 } \Delta E_1 - \text{试验台上制动器耗能 } \Delta E_2}{\text{路试时制动器耗能 } \Delta E_1} \right|$$

虽然不清楚路测时制动器的具体作用过程, 但根据模型假设 (3) 知道, 只有制动器耗能, 根据始末状态, 通过物理学中的能量关系有:

$$\Delta E_1 = \frac{1}{2} m (v_N^2 - v_0^2) = \frac{1}{2} J_v (\omega_N^2 - \omega_0^2) = \frac{1}{2} J_v [(2\pi n_N)^2 - (2\pi n_0)^2]$$

试验台上的制动过程能够通过试验测得的数据反应出来, 从而确定出制动器的耗能。在很短的时间 Δt 内, 可以忽略瞬时扭矩和瞬时转速的变化, 那么制动器的总耗能就

是这所有的 Δt 中的耗能之和:

$$\Delta E_2 = \left| \Delta t \cdot \sum_{i=0}^N T_{bi} \cdot 2\pi n_i \right|$$

最后给出制动耗能误差指标的表达式为:

$$\theta_1 = \left| \frac{\frac{1}{2} J_v [(2\pi n_N)^2 - (2\pi n_0)^2] - \Delta t \cdot \sum_{i=0}^N T_{bi} \cdot 2\pi n_i}{\frac{1}{2} J_v [(2\pi n_N)^2 - (2\pi n_0)^2]} \right| \quad (0.7)$$

(2) 角加速度的偏离度 θ_2

意义: 如果加速度经常突变, 那么机构内部会承受很大的柔性冲击, 这会造成机器的损坏并且可能影响传感器的精度从而在测试中引入较大误差。因此, 这个指标能在一定程度上评判一个预测控制方案的优劣。

定义:

$$\theta_2 = \sum_{i=1}^{N-1} \left(\frac{\beta_i - \min(\beta_i)}{\max(\beta_i) - \min(\beta_i)} \right)^2 \quad (0.8)$$

其中 $\beta_i = \frac{2\pi(n_{i+1} - n_{i-1})}{2\Delta t}$, $\min(\beta_i)$ 表示所有 β 中的最小值, $\max(\beta_i)$ 表示所有 β 中的最大值。

(3) 角速度的偏离度 θ_3

意义: 希望能够量化试验过程与路试过程在整个过程中的差别, 并且希望这个差别越小越好, 但是无法知道路试过程, 所以针对测得的**转速—时间**图像, 来进行低阶拟合, 并认为拟合出的图像近似的反应路试的过程, 这样就可以进行量化操作了。

定义:

$$\theta_3 = \sum_{i=0}^N \left(\frac{(n_i - n'_i) - \min(n_i - n'_i)}{\max(n_i - n'_i) - \min(n_i - n'_i)} \right)^2 \quad (0.9)$$

其中 n'_i 为拟合得到的第 i 个测量点的转速, $\max(n_i - n'_i)$ 表示 $n_i - n'_i$ 的最大值 $\min(n_i - n'_i)$ 表示 $n_i - n'_i$ 中的最小值。

8.1.2 评价函数的建立

将以上建立的三个指标进行线性加权, 定义出最终的评价函数, 也是**最终的评价模型**:

$$\theta = \lambda_1 \theta_1 + \lambda_2 \theta_2 + \lambda_3 \theta_3 \quad (0.10)$$

其中 λ_i 为 θ_i 的权值, $i=1, 2, 3$ 。

8.2 模型求解及结果分析

由于只对一个结果进行分析, 所以没有必要将评价函数值计算出来, 但本文依此计

算出了三个指标的值，并进行讨论、分析和评价。

(1) 制动耗能误差指标 θ_1 的计算

我们可以将附表中的数据代入 (0.7) 式，得出：

$$\Delta E_1 = 52150J, \quad \Delta E_2 = 49292J, \quad \theta_1 = 5.48\%$$

这个误差已经不小了，这会对测试的结果造成很大影响。

(2) 角加速度的偏离度 θ_2 的计算

利用 (0.8) 式，我们通过计算机编程，求解得出： $\theta_2 = 242.89$

下图表示角加速度随时间的变化情况，其中右图是角加速度关于时间的散点图。

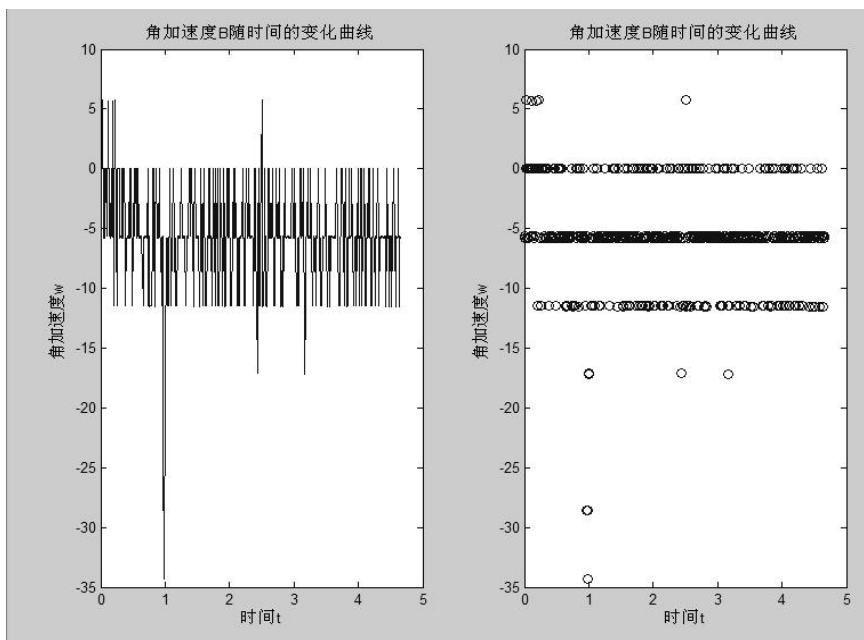


图 3 角速度—时间图

角加速度主要只有三种取值且角加速度在这三者之间频繁跳动。这种预测控制方案会使得制动器测试台承受很大的柔性冲击，并会对测试造成很大的波动。

角加速度的不稳定是由多方面的因素造成的。一是在一个信号采集周期内控制信号只能取一个定值；二是受传感器的精度限制；三是制动器和制动轴的震动。

(3) 角速度的偏离度 θ_3 的计算

角速度随时间的变化情况如下图所示

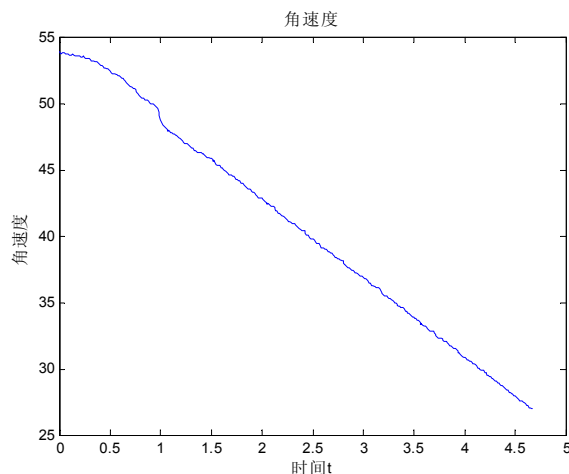


图 4 试验中角速度—时间曲线

可以看出在制动过程中的前一秒内，电动机和制动器仍然还处于反应阶段，此时的角速度随时间的关系与整体的情况不大一致。因此我们将前一秒的数据剔除，只求之后情况的角速度偏离量。

第一秒后速度随时间的变化情况以及线性拟合的情况如下图所示。

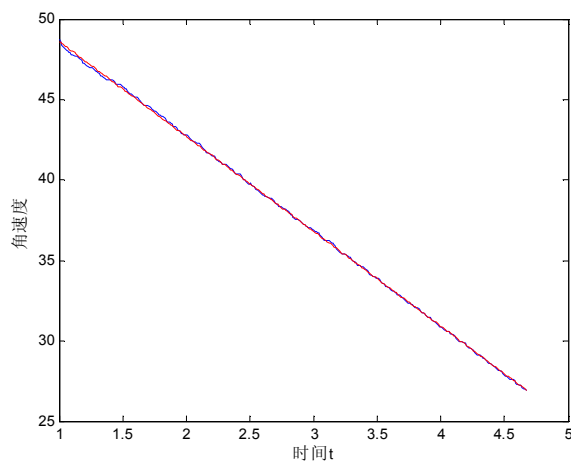


图 5 一次拟合后的角速度—时间曲线

带入数据求得 $\theta_3 = 113.3$

(4) 将 θ_1 、 θ_2 和 θ_3 代入评价模型 (0.10) 式，并且根据每种指标的重要性设置不同的权值，就可以对结果进行多方面的综合评价了。

九、问题五的模型建立与求解

9.1 模型建立

9.1.1 问题分析

本问就是解决两个**难点**：一、电流控制方案的设计；二、对方案的评价。

(1) 对于电流控制方案的设计，就是要给出电流随可观测量（瞬时转速 n 和瞬时扭矩 T_b ）的变化规律，也就是给出每个时刻对电流 I 的决策方案。但在每一步决策时，无

法依据之后的状态（没有一个可供比较的标准过程），导致这个问题的根本原因：制动器的**制动机理未知**。

(2) 对于一次试验，只知道初始条件，不知道整个标准过程（路测过程），当然也就不能对试验中的数据做相对“真实值”的误差分析，这也就对如何评价控制方案的好坏，提出了挑战。

所以问题五模型的建立就是针对以上两个难点，提出的**电流控制设计模型、控制方案评价模型**。

9.1.2 电流控制设计模型的建立

前提条件：测量和决策时刻为等距的离散的点，时间间隔为 Δt

我们给出两个设计模型，第二个模型为重点。

(1) 根据问题三中给出的模型

$$I(N\Delta t) = \eta \left(\frac{1-k}{k} \right) T_b(N\Delta t) \quad N = 0, 1, 2, \dots$$

这个模型是一个实时连续控制模型，即能针对某时刻测量得到的数据，迅速做出分析并决策，没有时滞，这样就可以实现无误差的控制。

显然这个无法实现，机器总会产生一定的时滞。但在某些近似处理中，也可以利用问题三中的模型，提出了**电流近似控制设计模型**：

$$I_i = \eta \left(\frac{1-k}{k} \right) T_{b(i)} \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (0.11)$$

注释：

I_i ——第 i 个决策时刻的电流 $T_{b(i)}$ ——第 i 个决策时刻测得的瞬时扭矩

这个方案不一定稳定，可能由于误差的累积，导致模拟的失败，后面将会作评价。

(2) 针对第一个方案的明显的不足，我们设计**基于能量反馈的电流控制模型**

改进方法：利用前面的状态，引入的负反馈来修正这种由于当电动机受到较大的扰动、噪声或由于时滞产生的误差，**将未补偿的电能量，在下次决策时补充回来**，从而快速回到正常值，这样就能使得模拟效果更好。

从问题三中的模型 $I_i = \eta \left(\frac{1-k}{k} \right) T_{b(i)}$ 出发，我们可以通过重新定义 K 来引入反馈。

局部符号说明（只适用于本模型建立）：

E_s ——可调节的电能量

E_m ——机械惯量的动能

E_v ——等效惯量的动能

t_0 ——开始制动时刻

t_i ——距 t_0 时刻 i 个 Δt 的时刻

K_i —— t_i 时刻的惯量模拟系数

E_i ——从 $t_{i-1} \rightarrow t_i$ 中应该补充的电能量

ω_i —— t_i 时刻的角速度

E'_i —— 从 $t_{i-1} \rightarrow t_i$ 中实际补充的电能量 $\overline{\omega}_i$ —— t_{i-1} 时刻估计 t_i 的角速度

制动过程中能量计算原理:

在某个转速 ω 下, 有 $E_m = \frac{1}{2} J_m \omega^2$, $E_v = \frac{1}{2} J_v \omega^2$, 且由补偿原理: $E_v = E_m + E_s$

将上式推导得出:

$$E_s = E_v - E_m = \frac{1}{2} (J_v - J_m) \omega^2 = \frac{1}{2} (k-1) J_m \omega^2 \quad (0.12)$$

控制方案设计^[3]:

a) 将试验机的制动过程分为 N 个 Δt 时间段, 从 t_0 时刻开始制动, 此时的惯量模拟系数 $K_0 = \frac{J_v}{J_m}$, 在 $t_0 \rightarrow t_1$, 以 K_0 值, 依据 (0.11) 式对电流进行调整。

从 $t_0 \rightarrow t_1$, 依据 (0.12) 式, 应该补充的电能量为 $E_1 = \frac{1}{2} (K_0 - 1) J_m (\omega_0^2 - \omega_1^2)$

实际补充的电能量为: $E'_1 = \int_{t_0}^{t_1} \frac{I_0 \omega}{\eta} dt$, 由于时间间隔很小, $t_0 \rightarrow t_1$ 视为匀加速, 则有:

$$E'_1 = \int_{t_0}^{t_1} \frac{I_0 \omega}{\eta} dt \approx \frac{I_0 (\omega_0 + \omega_1) \Delta t}{2\eta}$$

从而引入电能量误差: $\Delta E_1 = E_1 - E'_1$

b) 设法将电能量误差作为反馈因子, 反馈到 K_1 中, 从而影响 I_1 的决策, 实现在 $t_1 \rightarrow t_2$ 的过程中弥补, K_1 的确定方案为:

$$K_1 = \frac{\varepsilon \Delta E_1 + \frac{1}{2} J_m (\omega_1^2 - \overline{\omega}_2^2)}{\frac{1}{2} J_m (\omega_1^2 - \overline{\omega}_2^2)}$$

其中 ε 是一个常数, 它的值确定当模拟时有扰动时回到正常值的速度, 当 ε 较小时, 有扰动时回到正常值的速度很慢, 当 ε 值较大时, 拟合的参数会不停的波动, 同样达不到比较好的效果。 $\overline{\omega}_2$ 可以通过估计得: $\overline{\omega}_2 = \omega_1 + \frac{T_{b1}}{J_v} \Delta t$

c) 以此类推, 有**最终的基于能量反馈的电流控制模型:**

$$I_i = \eta \frac{K_i - 1}{K_i} T_{bi} \quad (0.13)$$

其中 $\overline{\omega}_{i+1} = \omega_i + \frac{T_{bi}}{J_v} \Delta t$, $\Delta E_i = E_i - E'_i = \frac{1}{2} (K_0 - 1) J_m (\omega_{i-1}^2 - \omega_i^2) - \frac{I_{i-1} (\omega_{i-1} + \omega_i) \Delta t}{2\eta}$,

$$K_i = \frac{\varepsilon \Delta E_i + \frac{1}{2} J_m (\omega_i^2 - \overline{\omega_{i+1}}^2)}{\frac{1}{2} J_m (\omega_i^2 - \overline{\omega_{i+1}}^2)}$$

9.1.3 方案评价模型的建立

下面从能量误差、驱动电流准确度、角加速度稳定度、制动力矩稳定系数等 4 个指标建立了计算机控制方案的评价指标体系。采用**基于空间距离的综合评价模型**可以对上述能量反馈控制方案以及问题四中的控制方案进行评价，结果能够证明，与理想点的差距越大，该控制方案越无效。

各指标符号只在本模型中适用。

局部符号说明：

N ——整个过程中对电流调节的次数

β_i ——第 i 时间段的实际角加速度

β_0 ——在一定的力矩和转速下，电动机输出稳定力矩时的理想角加速度

I_i ——第 i 个时间段的电流

I_0 ——在一定的力矩和转速下，电动机输出稳定力矩的理想电流

(1) 评价指标的建立

● 制动耗能误差指标 λ_1

其定义同 (0.7)

$$\lambda_1 = \left| \frac{\frac{1}{2} J_v [(2\pi n_N)^2 - (2\pi n_0)^2] - \left| \Delta t \cdot \sum_{i=0}^N T_{bi} \cdot 2\pi n_i \right|}{\frac{1}{2} J_v [(2\pi n_N)^2 - (2\pi n_0)^2]} \right|$$

误差指标 λ_1 越大，表明该控制方法的效果越不好。

● 角加速度的稳定度 λ_2

意义：稳定度与实际角加速度与理想角加速度之差的波动性呈负相关，故用方差来表示其波动性，于是角加速度的稳定度可以取其方差的倒数。

定义：

$$\lambda_2 = \frac{1}{\sigma_i + 1} = \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^2} + 1}$$

其中 $d = \sum_{i=1}^N |\beta_i - \beta_0|$ ，平均数 $\bar{d} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\beta_i - \beta_0|$

$$\text{记 } \sigma_i = \sqrt{\sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d}_i)^2}$$

角加速度的稳定度 λ_2 越小，表明角加速度随时间的波动越大，制动器存在着较大的柔性冲击。

●驱动电流的绝对准确度 λ_3

定义：由于准确度与偏差成反比，因此电流的绝对准确度 λ_3 取为偏差 D 的倒数（为防止分母为 0，在分母处加 1），即

$$\lambda_3 = \frac{1}{D+1} = \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (I_i - I_0)^2} + 1}$$

欧氏距离 D 来衡量电流偏差：
$$D = \sqrt{\sum_{i=1}^N (I_i - I_0)^2}$$

驱动电流的绝对准确度 λ_3 越接近于 1，表明该控制方案对电流的预测和控制越有效。

●制动力矩稳定系数 λ_4

定义：制动力矩稳定系数定义为同一次制动过程中，最小制动力矩 T_{\min} 与最大制动力矩 T_{\max} 之比：

$$\lambda_4 = \frac{T_{\min}}{T_{\max}}$$

●其他单项评价指标的确定，如能量耗散系数、速度稳定性、平均制动力矩等，可以根据实际情况加以考虑。（本题只是评价所设计的控制方法的优劣，题目中缺少这些数据，暂不考虑）。

(2) 空间距离综合评价模型^[6]

对计算机控制方案效果的评价，可以采用计算与理想水平之差的方法来得到，即空间距离综合评价法。与理想点的差距越大，控制效果越差；越接近理想点，可持续发展水平越强。

设单项指标的评价值 $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4\}$ ， λ_i 的取值在 0 和 1 之间，这些指标在几何上形成一个 4 维空间，而 λ 是这个空间中的一点，控制方法的理想点取为 $A = \{0, 1, 1, 1\}$ ，它也是这 4 维空间中的一点。距离综合评价法就是要衡量 λ 点到 A 点的空间距离。为了综合评价各指标对计算机控制方法的评价作用， λ 到理想点 A 点的距离采用欧氏距离，**空间距离综合评价模型：**

$$D(\lambda, A) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \alpha_i^2 (A_i - \lambda_i)^2}$$

其中 α_i 为各指标的权重，可以根据各单项评价指标的重要性或经验来确定。

9.2 模型求解

就建立起的电流控制方案的评价模型，在实验数据未知时，无法起作用，更无法判断控制方案的好坏，但可以采用计算机仿真，即给定**制动机理**和**初始条件**，模拟出试验结果，然后进行评价在问题六的解答中予以说明。

这里先做简要评论，仿真后的结果说明，问题五中给出的控制方法，电动机的电流随时间的波动较大，由于电动机的驱动电流和其产生的扭矩成正比，因此也和时间有相同的关系，这样电动机输给制动轴的扭矩随时间就有很大的波动。由公式，知电动机的角加速度 β 也随时间有较大的变化。这样电动机就不是做匀变速转动，其有很大的刚性冲击，时间久了对于制动器不利，对于这样的不足，我们在下面建立更为稳定的控制方案。

十、问题六的模型建立与求解

10.1 改进控制方案的建立

(1) 常规 PID 控制器^[3]

● 控制器的实现

在本电流适时调节系统中，直接对被控对象驱动电流 i 进行控制，并且 PID 控制器的三个参数 K_p K_I K_D 可以在线或离线整定。其控制原理示意图所示：

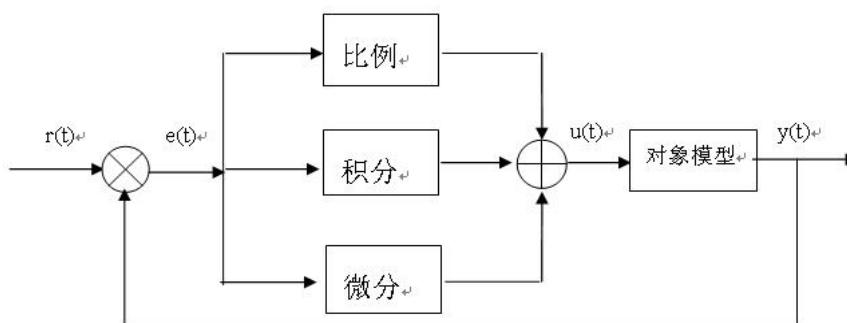


图 6 PID 控制原理图

上图所示的是一种线性控制器，根据给定的输入值**错误！不能通过编辑域代码创建对象。**与实际输出值**错误！不能通过编辑域代码创建对象。**构成控制器偏差**错误！不能通过编辑域代码创建对象。**，并将偏差的比例(P)、积分(I)和微分(D)通过线性组合构成控制量，对被控过程进行控制。

● 控制算法

PID 控制算法连续方程^[5]为：

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^T e(t) dt + K_D \frac{d(e(t))}{dt} \quad (0.14)$$

其中， $u(t)$ 为调节器的输出， $e(t)$ 为调节器的输入(通常为系统的误差信号)， K_p 为比例放大系数， K_I 为积分比例系数， K_D 为微分比例系数， T 为采样周期。

当采样周期 T 较小时, 用求和代替积分, 微分用有限差分代替, 可以得到如下离散化的方程:

$$u(t) = K_p e(t) + K_I T \sum_{i=1}^t e(i) + \frac{K_D}{T} [e(t) - e(t-1)] \quad (0.15)$$

上一个时刻的计算值为:

$$u(t-1) = K_p e(t-1) + K_I T \sum_{i=1}^{t-1} e(i) + \frac{K_D}{T} [e(t-1) - e(t-2)] \quad (0.16)$$

将 (0.15)、(0.16) 两式相减, 得输出值的增量:

$$\Delta u(t) = u(t) - u(t-1) = K_p [e(t) - e(t-1)] + K_I T \cdot e(t) + \frac{K_D}{T} [e(t) + e(t-2) - 2e(t-1)] \quad (0.17)$$

再设:

$$\begin{cases} x_1(t) = e(t) - e(t-1) \\ x_2(t) = T e(t) \\ x_3(t) = \frac{e(t) + e(t-2) - 2e(t-1)}{T} \\ x_4(t) = u(t-1) \end{cases} \quad (0.18)$$

则 (0.17) 式可以化为:

$$u(t) = K_p x_1(t) + K_I x_2(t) + K_D x_3(t) + x_4(t) \quad (0.19)$$

(2) 基于 BP 神经网络的 PID 控制器的设计^[8]

● 神经网络算法和 PID 控制器的工作过程及原理

神经网络在这里作为在线估计器, 控制信号由 PID 控制器发出。首先神经网络按照 BP 学习算法进行离线学习, 然后接入系统, 一方面实时的给出最佳 PID 控制参数, 另一方面还要继续学习, 不断调整神经网络中各神经元之间的权系数, 以适应受控对象的变化。神经网络输出层的输出参数对应 PID 控制器的 3 个可调参数 K_p K_I K_D , 通过神经网络的学习不断调整加权系数, 从而使其稳定状态对应于某种最优控制律下的 PID 控制器参数, 并使控制器适应受控对象结构参数以及环境的变化。

● 系统结构图

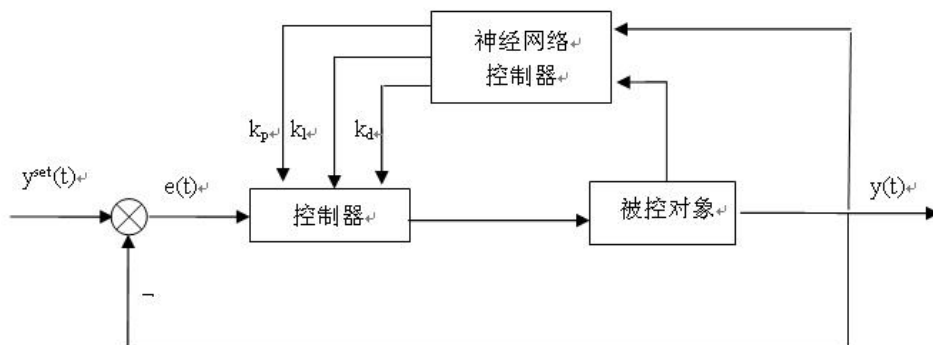


图 7 系统结构图

●BP 神经网络参数的设置^[7]

a) 输入层、隐含层、输出层结构的设定

BP 神经网络的输入变量个数取决于被控系统的复杂程度，输出节点对应的是 PID 的三个可调参数 K_p 、 K_I 、 K_D 。由于输出不能为负，所以输出层激活函数取非负的 Sigmoid 函数，隐含层取正负对称的 Sigmoid 函数。由此，我们构造一个三层 BP 网络的结构如图 4:

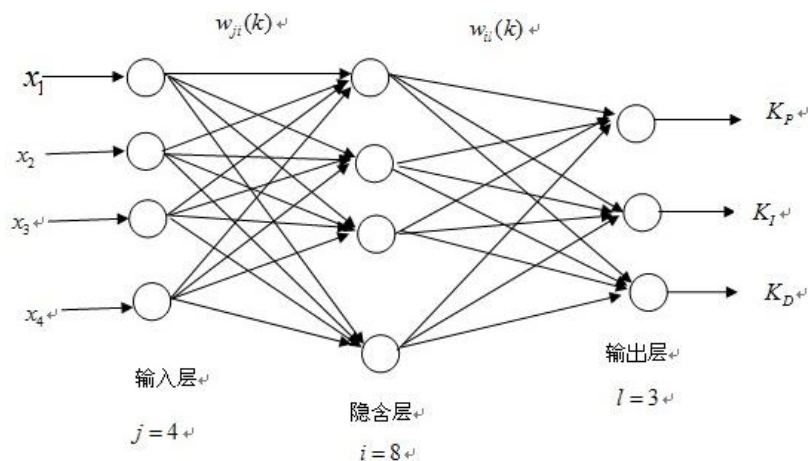


图 8 三层 BP 网络结构图

b) 各层输入与输出的确定

依式 (0.18)，将网络的输入变量 $x_j(t)$ ($j=1,2,3,4$) 作为控制器的输入，即网络输入层的输出：

$$O_j^{(1)} = x_j \quad (j=1,2,3,4)$$

网络隐含层的输入、输出为：

$$\begin{cases} net_i^{(2)}(k) = \sum_{j=0}^M w_{ij}^{(2)} O_j^{(1)} \\ O_i^{(2)}(k) = f(net_i^{(2)}(k)) \end{cases} \quad (i=1,2,\dots,8)$$

其中， w_{ij}^2 为隐含层的加权系数；上角标 (1)、(2)、(3) 分别代表输入层、隐含层和

输出层。

网络输出层的输入、输出为：

$$\begin{cases} net_l^{(3)}(k) = \sum_{i=0}^Q w_{il}^{(3)} O_i^{(2)}(k) \\ O_l^{(3)}(k) = g(net_l^{(3)}(k)) \quad (l=1,2,3) \\ O_1^{(3)}(k) = K_p \\ O_2^{(3)}(k) = K_I \\ O_3^{(3)}(k) = K_D \end{cases}$$

上式中，输出层输出节点分别对应三个可调参数 K_p K_I K_D

上面各式中，M, Q 分别为输入层、隐含层结点个数。

c) 利用最小二乘法的思想取性能指标函数

$$E(t) = \frac{1}{2} (r(k) - y(k))^2$$

各层激发函数： $f[\bullet] = \tanh(x)$, $g[\bullet] = \frac{1}{2}[1 + \tanh(x)]$

这样，通过设定一定的学习速率、训练目标、训练次数，就可以得出各层的权系数。

10.2 模型的仿真与评价

(1) 基于 BP 神经网络和 PID 控制器的电动机电流自适应控制模型^[8]

由 (0.18) 式和 (0.19) 式有

$$u(t) = f[u(t-1), K_p, K_I, K_D, e(t), e(t-1), e(t-2)] \quad (0.20)$$

式中， $f(\bullet)$ 是与 $u(t-1)$, K_p , K_I , K_D , $y(t)$ 有关的非线性函数，可以用 BP 神经网络通过训练和学习找到这样一个最佳适应规律。

结合本题，有，

$$i(t) = f[i(t-1), K_p, K_I, K_D, w(t), w(t-1), w(t-2), T_b(t), T_b(t-1), T_b(t-2)] \quad (0.21)$$

即 t 时刻的电流与 t 时刻的主轴转速、制动力矩， $t-1$ 时刻的电流、主轴转速、制动力矩， $t-2$ 时刻的主轴转速、制动力矩有关。

而其中瞬时主轴转速 w 、瞬时制动力矩 T_b 都是可以观测的物理量，上一时刻即 $t-1$ 时刻的电流也已知，因此由 (0.20) 式，通过神经网络和 PID 控制，就可以精确地设计出下一个时刻的电流值。当保持电动机的驱动电流 i 在一段时间内恒定时，电机输出的力矩也是一个定值，于是制动器的角速度就能已恒定的减速度逐渐减少，即避免了刚性冲击，也避免了柔性冲击。

注：上面所有的 $t-1$ 时刻均指的是时刻 t 的前一时刻。

(2) 模型的验证

● 基于 BP 神经网络的 PID 控制算法流程：

其中，以 $u(t)$ 代替电动机的输出驱动电流 i ，以 $e(t)$ 泛指神经网络的输入参数：

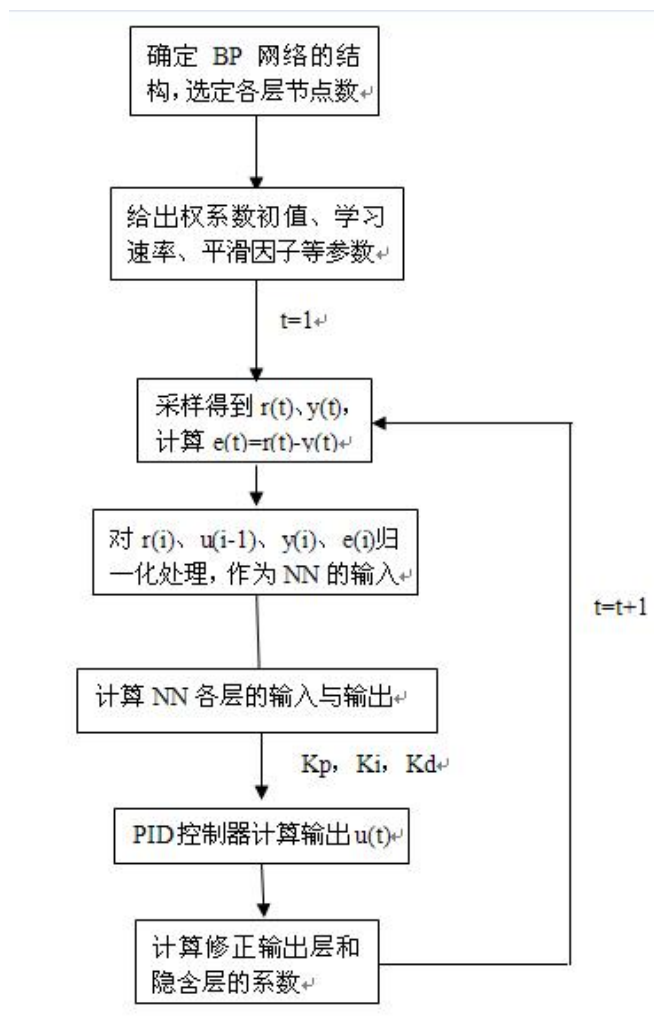


图 9 基于 BP 神经网络的 PID 控制算法流程图

● 模型的验证及仿真^[4]

a) 模型的简化

由于原问题中未给出转速、力矩、电动机的性能参数等指标或数据，这里，为简化起见，将原模型简化成单神经元自适应控制器。单神经元自适应控制器是通过调整加权系数的调整来实现自适应、自组织功能的，权系数的调整是按照有监督的 Hebb 学习规则实现的。并且，在自调整单神经元 PID 控制器中引入最优控制理论中的二次型性能指标，通过修改神经元控制器的权系数来使性能指标趋于最小，以此来实现了对控制器性能的优化。

b) 被控制过程的模型

$$y(t) = 0.368y(t-1) + 0.264y(t-2) + u(t-d) + 0.632u(t-d-1) \quad (0.22)$$

仿真过程中，输入的阶跃响应信号 $r(t) = 1.0$ 可以代表原模型中需要达到的电动机电流的稳定值。 $y(t)$ 是输出值。

二次型性能指标:

$$E(t) = \frac{1}{2} [P(r(t) - y(t))]^2 + Q\Delta^2 u(t)$$

C) 仿真参数选择

启动时采用开环控制, 取 $u = 0.1726$, 神经元比例系数 $K = 0.02$, 输入误差和控制增量的加权系数分别为 $P = 2, Q = 1$; $d = 6$; 比例、积分、微分三部分的加权系数学习速率分别取 $\eta_1 = 4, \eta_2 = 120, \eta_3 = 159$; 初始权系数 $w_1(0) = 0.34, w_2(0) = 0.32, w_3(0) = 0.33$ 。

在原问题的模型中, (0.22) 式的解释为 t 时刻的驱动电流值可以由 $t-1$ 和 $t-2$ 时刻的电流值以及 $t-6, t-7$ 时刻的某一个可观测量决定。这里没由与原问题的模型 (0.21) 式保持完全一致的原因也是为了保持一般性, 并且兼顾简化的原则。

d) 仿真结果

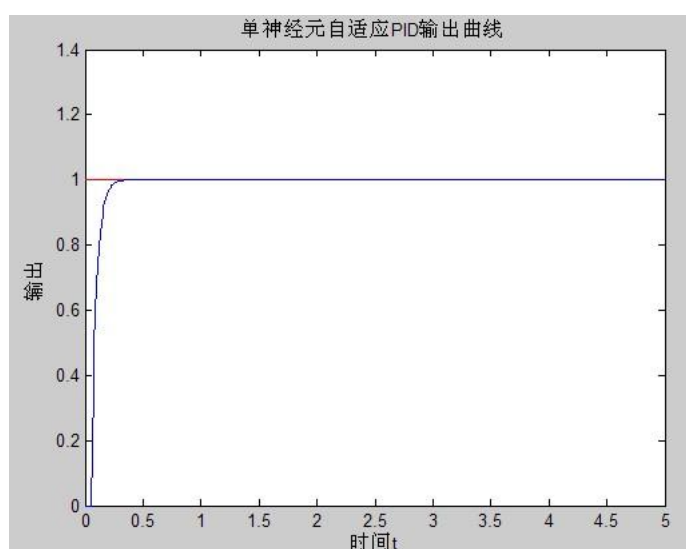


图 10 单神经元自适应 PID 输出曲线

观察图 10、图 11, 有以下结论:

●由图 10 可以看到, 输出值在 $t = 0.5s$ 时就达到了预期的值, 并且保持恒定不变。在电机的实际运转过程中, 这一点是很重要的, 因为为了保证电机平稳的运转, 在它启动后的一个很短的时间内, 应该能够输出稳定的力矩 (因为其驱动电流和输出力矩成正比)。

●图 11 是单神经元 PID 仿真过程中权值随时间的变化曲线, 可以看到权值从开始的波动到最后保持稳定需要的时间也很小、

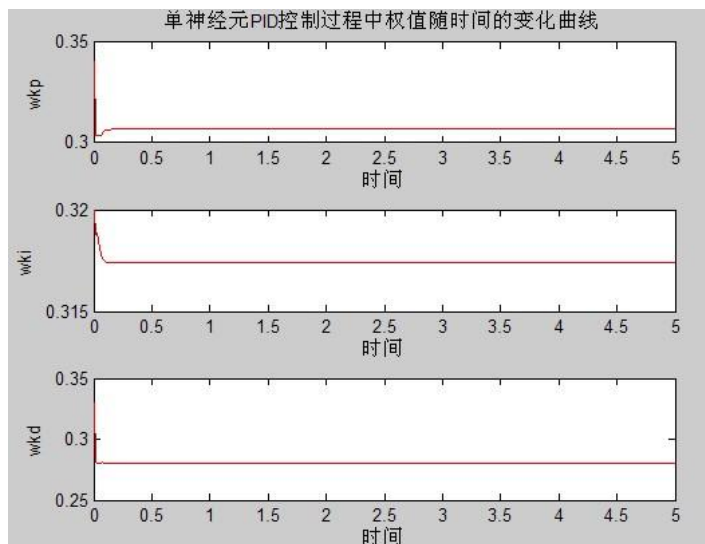


图 11 单神经元 PID 控制过程中权值随时间的变化曲线

e) 加入噪声等干扰信号

在 $t = 1s$ ，加入一个干扰信号，将输出值提高 0.1，由图 12 可以看到，输出值在很短的时间内又回到预期的值，并且此后同样保持不变。由此可见，系统具有较好的快速性、较小的超调量和较强的鲁棒性；并且系统具有较强的抗干扰能力。

抗干扰在电动机的实际运转过程中是很重要的，因为电机可能会不时的随机受到外界干扰，其外加电压或负载也可能周期性的波动，导致其电流值不稳定。而图 12 的结果很好的证明了模型 (0.21) 具有很好的鲁棒性和抗干扰能力。这样就验证了原模型的有效性。

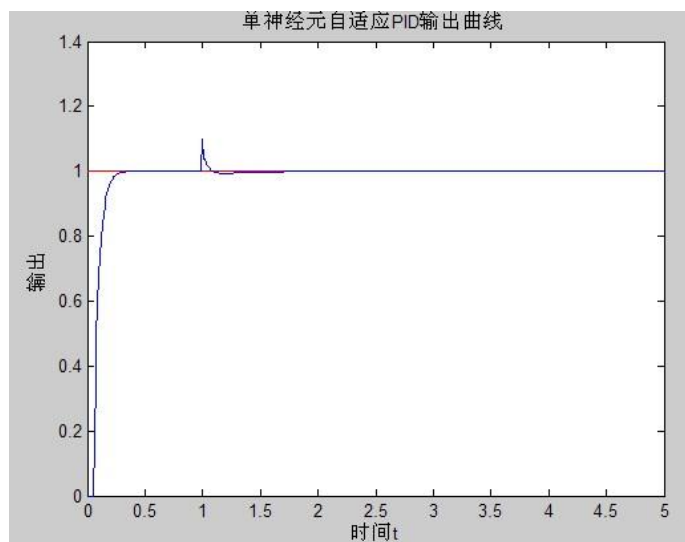


图 12 单神经元自适应 PID 输出曲线

十一、模型比较，改进和推广

11.1 模型的比较

(1) 复杂程度

能量反馈电流控制模型的数据处理与计算都不复杂，处理起来较容易；基于 B P 神经网络的 PID 自适应控制模型随着系统参数的变化，复杂度会大幅上升，收敛速度减慢，操作起来比较困难。

(2) 模型的精度

能量反馈电流控制模型虽然引入了负反馈，通过将输出的电流值又以某种方式返回到输入端，使系统趋于稳定，但是还是受扰动项的影响较大，不能很好的控制下一时间段的电流值；而基于 B P 神经网络的 PID 自适应控制模型全面考虑了各种影响输出值的因素，通过神经网络的并行处理和自学习能力，不断调整 PID 的参数，使输出的电流值基本稳定，并且抗干扰能力强。

11.2 模型的优缺点

优点：

(1) 问题五中能量反馈电流控制模型型简单易行，可以基本实现根据前一时间段的可观测量，来控制本时间段的电流，并且引入的负反馈，可以使电流基本平稳，达到控制的目的。

(2) 问题六中的基于 B P 神经网络的 PID 自适应控制模型，由仿真可知，它可以很好的根据已知量来调节本时间段的电流值，并且有很快的调节速度，较强的鲁棒性，收敛速度快。

(3) 各种评价方案考虑了很多指标，能够较全面的从试验台上影响制动器性能的多方面入手，可以避免主观偏好的影响，能够较好的对控制方案的执行结果进行评价。

(4) 误差积累传递小，应用范围广泛。

不足：

(1) 本文未对非恒力矩式控制器系统进行研究和建模，而这一情况是实际中常常遇到的。

(2) 控制方法的评价很多只是用公式或模型定性的分析了控制方法的优劣，未用实际数据证明某一种控制方法确实好还是坏。

(3) 问题五的能量反馈电流控制模型的输出电流值受随机扰动项的影响较强，引入的负反馈未能完全消除这一噪声影响。

(4) 把每一时间段内的运动近似看成匀变速运动，角加速度恒定，而这必然有一定的误差。

(5) 基于 B P 神经网络的 PID 自适应控制模型，没有针对实际情况进行仿真验证，而只是对简化后的模型进行了简要的仿真，可能原模型在实际中也会受到来自各方面的不确定影响。

(6) 当问题复杂时, PID 控制模型的复杂度也会大幅上升, 神经网络的收敛时间大大增加。

11.3 模型的改进及推广

(1) 针对标准 BP 算法存在全局搜索能力弱和易陷入局部极小点等缺点, 将遗传算法与 BP 神经网络相结合, 构造一种新的进化神经网络 GA—BP 算法, 并将该算法应用于电动机调速、调节电流值等, 适用范围很广。实际上, 将 BP 神经网络、遗传算法与 PID 控制器相结合, 在电机参数调节、交流矢量控制、磁流变制动、变频器、可编程控制器等很多需要动态实时调节系统参数等领域有着广阔的发展前景。

(2) 针对问题五, 可以采用时间序列分析的方法, 建立一个非平稳序列的差分模型, 针对依时间周期性变化的随机序列, 可以建立季节性**错误! 不能通过编辑域代码创建对象**模型, 平稳性检验后, 消除趋势分量和季节分量, 再进行模拟和辨识后, 对下一时刻的电流值进行预报和控制, 这样, 可能效果更好。

(3) 针对控制方案的设计, 可以考虑采用广义预测控制 GPC。广义预测控制具有预测滚动优化和反馈校正等基本特征, 在这里, 可能也有良好的控制性能和鲁棒性。有约束的广义预测控制将加快收敛速度, 使预测输出和输入增量更快的达到稳态。

参考文献

- [1] 董霖, MATLAB 使用详解, 北京: 科学出版社, 2008
- [2] 周洪旋, 制动器试验台电惯量系统控制方法研究, 吉林大学硕士学位论文, TP276: 26-51, 2006。
- [3] 汪本强, 摩擦试验机电惯量控制系统的研究, 中南大学硕士学位论文, 19-22, 2006 年 6 月
- [4] 任雯, 闻霞, 王维庆, 基于线性二次型的神经元 PID 最优控制器设计及仿真, 计算机应用与软件, 第 25 卷第 5 期: 1-3, 2008 年 5 月。
- [5] 郭润夏, 神经网络 PID 在电机调速中的作用, 中国民航大学学报, 第 25 卷第 2 期: 1-3, 2007 年 4 月。
- [6] 张晓红, 权小锋, 基于空间距离综合评价模型的企业可持续发展研究, 商业研究, 总第 386 期: 1-4, 2009 年 6 月。
- [7] 黄金燕, 葛化敏, 唐明军, 基于 BP 神经网络的 PID 控制方法的研究, 人工智能, 第 22 卷第 9-2 期: 1-3, 2006 年
- [8] Matlab 神经网络工具箱应用简 <http://mcm.ustc.edu.cn/download/matlab16.pdf> 2009-9-14